METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DO ALBEDO DO SOLO A PARTIR DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Luiz Filipe Santana Oliveira Reis – <u>luizfilipe.sor@gmail.com</u> / luiz.reis@casadosventos.com.br Casa dos Ventos Energias Renováveis

Resumo. A fração da luz incidente, refletida por uma superfície é definida como sendo o seu albedo. Conhecer o albedo de uma determinada área é útil para estudos relacionados a projetos de usinas fotovoltaicas que utilizam módulos bifaciais. Ao contrário dos painéis convencionais, esses módulos são capazes de gerar eletricidade a partir das suas duas faces. Dentre as vantagens associadas ao seu uso, destaca-se o aumento da densidade energética. Alguns trabalhos recentes, evidenciam a forte relação que o albedo possui com o ganho energético proporcionado por painéis bifaciais. Conhecer a sazonalidade do albedo é de suma importância para os cálculos de previsão e precificação da energia gerada no projeto. As normativas vigentes recomendam que o albedo do solo seja mensurado utilizando piranômetros. Entretanto, o dispêndio com a aquisição e manutenção desses equipamentos acaba tornado a sua instalação muitas vezes inviável. Em virtude disso, o objetivo deste trabalho, foi avaliar a viabilidade de uma metodologia de baixo custo, para medição do albedo do solo. A metodologia usada sugere que o albedo do solo pode ser obtido a partir da análise do brilho das regiões de uma imagem contendo o solo e uma folha branca. Com o propósito de calcular a acurácia do método, foram realizadas coletas de imagens do solo na cidade de Petrolina-PE e comparadas com medições realizadas a partir de piranômetros modelo SR15-D2A2® (Hukseflux). Além disso, foi desenvolvido um script para o processamento em massa das imagens, bem como um modelo de ajuste utilizando o algoritmo Randon Forest, com $R^2 > 0.99$, que relaciona os dados obtidos, a partir do processamento das imagens, com valores medidos por um albedômetro composto por piranômetros da marca Hukseflux.

Palavras-chave: Energia Solar, Albedo do Solo, Modelo Preditivo

1. INTRODUÇÃO

É crescente a utilização de painéis bifaciais em projetos de usinas fotovoltaicas. Os módulos bifaciais possuem células fotovoltaicas que captam radiação a partir das duas faces, permitindo que a energia seja gerada a partir da parte frontal e traseira do módulo (TAKATA, M., 2019). De acordo com uma projeção recente do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), os painéis bifaciais irão representar uma parcela de 60% do mercado mundial em 2029 (DELINE, et al. 2019).

Dentre as vantagens da utilização dos módulos bifaciais, está o aumento da densidade energética da usina. Entretanto, a produção energética e o rendimento das usinas que utilizam painéis bifaciais sofrem forte influência do albedo. Dessa maneira, a avaliação dessa grandeza torna-se cada vez mais importante no processo de previsão e precificação da energia gerada.

Em Sánchez-Ortiz et al. (2020), foram realizadas análises com o objetivo de estimar a influência das variáveis de projeto no ganho frente-costas de painéis bifaciais. Para isso, foram feitas simulações com as principais ferramentas utilizadas no dimensionamento de projetos fotovoltaicos. A Fig. 1 mostra a forte relação linear entre o ganho energético do sistema e o valor de albedo do solo comprovando a importância dessa variável para o desenvolvimento de usinas que utilizam painéis bifaciais.



Figura 1 - Comparação do efeito da razão de irradiância traseira / frontal para diferentes modelos Bernburg e Cartago. Fonte: (SÁNCHEZ-ORTIZ et al., 2020)

A norma E1918-06 (2015) trata da determinação do albedo do substrato em superfícies de baixa inclinação. O procedimento de medição é realizado posicionando um par de piranômetros a pelo menos 0,5 m do solo. Um dos piranômetros é montado com o sensor voltado para o céu enquanto que o outro é direcionado para o solo, medindo a radiação incidente e a radiação refletida, respectivamente. O albedo é obtido no pós-processamento dos dados, sendo esta a razão entre as radiações medidas pelo piranômetro inferior e superior.

Contudo, as recomendações não são suficientes para padronizar a medição de albedo utilizando piranômetros. A falta de padrão cria inconsistência de dados e introduz uma incerteza de medição significativa, relacionada a mudanças diurnas e sazonais no albedo e sombreamento irregular no verso, raramente considerados (SÁNCHEZ-ORTIZ et al., 2020). Além disso, o elevado custo de aquisição, manutenção e operação dos equipamentos acaba inviabilizando a medição de albedo, não só em alguns projetos de pequeno porte, mas também em áreas que já tiveram sua campanha de medição encerrada sem a aquisição dessa variável.

Atualmente, as medições via imagens de satélite são uma forma alternativa para a aquisição desses dados. Essas usam diferentes abordagens para estimar os dados de albedo. Contudo, os dados obtidos nas medições via satélite, no geral, possuem uma resolução muito menor tanto espacialmente quanto temporalmente, quando comparadas com as medições baseadas no solo, dificultando a comparação entre os dados (DITTMANN, et al., 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicabilidade da metodologia de medição de albedo, a partir do processamento de imagens digitais. A acurácia da técnica foi avaliada comparando o valor médio diário do albedo, obtido a partir do processamento das imagens, com os valores medidos por piranômetros modelo SR15-D2A2® (Hukseflux). A escolha do valor médio diário como variável de análise, está relacionado com o processo de projeto de usinas fotovoltaicas. Visto que esse é o parâmetro de entrada do albedo para os principais softwares de dimensionamento. Para o levantamento dos dados, foram realizados dois ensaios na cidade de Petrolina-PE, onde foram obtidas 5180 imagens. Além disso, foi desenvolvido um *script* para o processamento em massa das imagens, assim como um modelo de ajuste para as curvas calculadas.

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A metodologia estudada e aprimorada neste trabalho teve inspiração em Morton, S. (2010). O trabalho propõe uma forma de medição de albedo utilizando imagens de câmeras digitais. A estimação dos valores tem o objetivo de avaliar os impactos da variação do albedo da terra no ecossistema das regiões polares do globo.

Para a medição do albedo por meio dessa técnica, é necessário que seja feito um registro fotográfico digital contendo a superfície em análise e um papel branco. Segundo Morton, S. (2010), medições prévias realizadas na folha com a utilização de um luxímetro (medidor de densidade luminosa) apontaram que o material possui um albedo de aproximadamente 0,60. A partir dessa informação, são realizadas análises utilizando o *software* Photoshop Elements® (Adobe), onde são coletados os valores do brilho médio dos *pixels* para porções de cada uma das regiões.

Para que seja possível a realização do cálculo do albedo, assume-se que a radiação refletida pelo solo é diretamente proporcional à quantidade de luz que chega ao obturador de uma câmera, quando utilizada para fotografar essa superfície. O albedo de uma folha é dado pela Eq. (1).

$$Albedo_{folha} = \frac{RAD_{folha}^{\uparrow}}{RAD_{folha}^{\downarrow}}$$
(1)

Em que, $Albedo_{folha}$ é o albedo da folha, RAD_{folha}^{\uparrow} a radiação refletida pela folha (W/m²), e RAD_{folha}^{\downarrow} a radiação incidente na folha (W/m²). Conhecendo o valor do albedo da folha, pode-se realizar o cálculo da radiação incidente, que chega de maneira uniforme às superfícies que compõem a imagem. De acordo com a proposição de Morton, S., (2010), é possível realizar o cálculo do solo a partir da Eq. (2):

$$Albedo_{solo} = \frac{RAD_{solo}^{\uparrow}}{RAD_{folha}^{\uparrow}} Albedo_{folha}$$
(2)

Em que, $Albedo_{solo}$ é albedo do solo, e RAD_{solo} radiação refletida pelo solo (W/m²). No entanto, a técnica proposta possui limitações, visto que os sensores da maioria das câmeras digitais disponíveis no mercado são sensibilizados no espectro próximo do visível de 350 a pouco mais de 1100 nm, enquanto que uma parcela considerável da radiação solar que chega à superfície possui componentes no espectro infravermelho.

Uma outra abordagem utilizando papel para a medição de albedo é encontrada em Brennan, P. A. (1968). No trabalho é utilizado um espectrorradiômetro modelo SR® (ISCO), para medir a densidade do fluxo de luz incidente e refletida de uma superfície, a fim de calcular o seu albedo. Contudo, como o equipamento só possui uma cabeça de fibra óptica, para alternar a medição da radiação refletida para a incidente é preciso girar fisicamente o sensor.

Como forma de medir a radiação incidente sem que seja necessário girar a cabeça do sensor 180° é proposto que a estimação da radiação incidente seja feita a partir de um cartão branco. Para viabilizar a técnica foi necessária a medição do albedo de uma cartolina branca para 31 comprimentos de onda, utilizando o próprio espectrorradiômetro. Em

Brennan, P. A. (1968) é apontada como desvantagem da técnica a variação do albedo do cartão em função da idade, sujeira e da posição do Sol.

3. METODOLOGIA

A partir de Morton, S. (2010) e Brennan, P. A. (1968), foram iniciados estudos com o intuito de aprimorar as metodologias propostas para medição de albedo do solo utilizando comparações entre o brilho médio da folha e da região de interesse. Foram ainda realizadas análises qualitativas e quantitativas, a fim de mensurar a eficiência e a aplicabilidade da técnica.

A primeira etapa dos estudos foi a avaliação das variáveis, como forma de identificar quais possuem mais influência para o sistema. Foram analisados, por meio de ensaios, os parâmetros da câmera, a influência de variações na folha de referência e a técnica de captura das imagens. O mapeamento das variáveis foi um guia para o aprimoramento da metodologia e garantiu a reprodutibilidade das medições.

3.1 Escolha das Câmeras e dos seus parâmetros

Para a realização dos ensaios, foram escolhidas duas câmeras. Uma câmera compacta modelo DSC-HX 350® (Sony), que utiliza um sensor CMOS Exmore R® (Sony), e um aparelho *smartphone* modelo SM-N9600® (Samsung). A câmera traseira do celular também também possui tecnologia CMOS, embarcada no sensor ISOCELL 2L3 (SAK2L3)® (Samsung).

Um dos critérios de escolha para os modelos foi a possibilidade de configuração manual dos parâmetros que compõem o triângulo de exposição da câmera: sensibilidade ISO, abertura do obturador e velocidade do obturador. Uma vantagem do *smartphone* é que quando configurado para capturar imagens utilizando o modo manual, o aparelho armazena para uma mesma cena, o arquivo em formato comprimido JPG e no formato bruto, com extensão DNG. As imagens de saída das câmeras possuem 8 bits por *pixel*, totalizando 256 valores possíveis para o brilho de cada um dos pontos da imagem.

Para avaliar os parâmetros de exposição das câmeras, foram registradas 796 fotografias, entre os dias 27 de setembro e 08 de novembro de 2020. A grande maioria das fotos registradas foi obtida em dias com baixa cobertura de nuvens, no intervalo das 09h00 às 15h00, horário local. A escolha do horário e das condições climáticas foi baseada na normativa E1918-06 (2015), que sugere que nesse intervalo a radiação solar atinge valores superiores a 70% dos valores obtidos no meio dia solar.

Nos testes foi identificada uma grande variação na medição do brilho médio das regiões em função da mudança dos parâmetros do triângulo de exposição. Com o objetivo de garantir a reprodutibilidade das medições, optou-se por configurar a câmera de modo que o brilho médio das imagens na região da folha tenha um nível de intensidade de aproximadamente 215. O valor de ISO foi configurado próximo ao limite inferior de cada câmera, a fim de reduzir os ruídos na imagem. Já os valores de abertura e velocidade do obturador foram variados de modo a se obter fotos com todas as possíveis combinações dos parâmetros. A definição dos parâmetros veio a partir de plotagens obtidas do brilho médio dos *pixels* na região da folha em função dos parâmetros da câmera.

3.2 Estimação do albedo do papel sulfite

Além dos parâmetros da câmera, uma variável extremamente importante para o sistema é o papel utilizado como região de controle. Os resultados obtidos em Morton, S. (2010) utilizando um luxímetro indicam um valor de aproximadamente 60% para o albedo do papel. Em Dittmann, et al. (2019) foi realizada a medição de albedo de uma área de 2 x 2 m coberta com papel branco. Para as medições, foram posicionados dois pares de piranômetros SMP10V® (Kipp & Zonen), sendo um par posicionado no plano horizontal e um par posicionado com 35° de inclinação. Os ensaios foram realizados ao meio-dia. O albedômetro posicionado no plano inclinado mediu 27% de albedo para a folha branca, enquanto que o conjunto de equipamentos posicionado horizontalmente obteve 39%. As medições em Brennan, P. A. (1968) mostram uma variação de 58% a 72% no albedo médio da cartolina branca, para 31 comprimentos de onda entre 400 e 1550 nm. Porém, em nenhum dos estudos são apresentadas as características dos papéis utilizados.

Em virtude disso, foram realizadas medições de reflectância difusa para estimar o albedo de folhas de papel sulfite tamanho A4 de quatro fabricantes diferentes. Em cada folha, fez-se três medições, sendo uma próxima a cada uma das extremidades e outra no centro. Seguindo a mesma metodologia, o experimento também foi realizado sobrepondo folhas iguais.

Para a execução dos ensaios, foi utilizado um espectroradiômetro FieldSpec® 3 (ASD Inc.), capaz de realizar medições de reflectância entre 350 a 2500 nm com passos de 1 nm. A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada halógena de 50 W da marca Ushio, alimentada com uma tensão de 14,5 V, formando um ângulo de 45° com o alvo. Já a coleta dos valores de reflectância realizada pelo espectrorradiômetro foi feita com um ângulo de 180°.

Conforme recomendado pelo fabricante do espectroradiômetro, realizou-se a pré calibração do equipamento, utilizando um branco padrão composto por sulfato de bário e como forma de mitigar as interferências causadas pela iluminação difusa as amostras foram colhidas em uma sala escurecida. O sistema montado pode ser visto na Fig. 2.



Figura 2 - Ensaio de medição da refletância da folha. Fonte: Autor

A informação de saída do espectroradiômetro consiste em uma tabela contendo os valores de reflectância em função do comprimento de onda, com precisão de 14 dígitos. As curvas obtidas apontam resposta espectral plana entre 650 e 1400 nm para todas as folhas avaliadas. Para o cálculo do albedo, utilizou-se a metodologia trabalhada em Post et al. (2000). No trabalho é apresentada uma regressão linear múltipla com R²=0,96 para o cálculo do albedo de solos nus, na faixa de 300 a 2800 nm, a partir de dados de radiômetros multiespectrais. A regressão é calculada para quatro bandas discretas: azul (450-520 nm), verde (520–600 nm), vermelho (630–690 nm) e *Near-infrared* (NIR) (760–900 nm), como mostra a Eq. (3).

$$Albedo_{300-2500\,nm} = 0,785(NIR) + 0,872(Verde) + 0,745(Azul) + 0,01$$
(3)

Em que, Albedo_{300 - 2500 nm} é albedo na faixa de 300 a 2800 nm, (NIR) é a média das reflectâncias obtidas entre

760 e 900 nm, (*Verde*) é a média das reflectâncias obtidas entre 520 e 600 nm, e (*Azul*) é a média das reflectâncias obtidas entre 450 e 520 nm. Diante dos resultados obtidos, pôde-se verificar um desvio padrão que corresponde a 3,68% dos valores médios de albedo dos papéis sem sobreposição. Foi também verificado um aumento percentual médio de 8,28% no albedo de papéis sobrepostos, quando comparados com as medições sem sobreposição. Até mesmo para as folhas de fabricantes que compartilham a mesma matéria prima e gramatura, foi encontrada uma diferença de 6,74% entre os valores calculados.

Apesar dos resultados médios de albedo serem de pouca relevância para os resultados finais deste trabalho, os ensaios mostraram que a utilização de papéis diferentes, pode afetar a reprodutibilidade do albedo medido a partir da análise das imagens digitais. Para minimizar essas interferências, foram utilizados papéis de somente um fabricante, sem a realização de sobreposição.

3.3 Metodologia de aquisição das imagens

Para a aquisição das imagens, a câmera foi posicionada a aproximadamente 1 metro de altura do solo. O posicionamento superior a 50 cm é útil para atenuar os efeitos negativos causados pelo sombreamento projetado pela câmera. Ainda como forma de evitar o sombreamento da cena, e seguindo as recomendações de fabricantes de piranômetros, a folha foi posicionada entre o observador e a linha do equador.

Para evitar a variação de albedo da folha em função do seu envelhecimento, descrita em Brennan, P. A. (1968), foram utilizadas somente folhas novas, sem riscos ou amassados. E para impedir o deslocamento do papel causado pelo vento, foi realizada a fixação da folha a uma prancheta utilizando fita adesiva transparente do tipo dupla face.

Para a realização dos ensaios foram escolhidos locais limpos e sem obstáculos ou objetos que pudessem descaracterizar o albedo da região de interesse. As medições foram realizadas em dias de baixa cobertura de nuvens, nos momento em que o disco solar se encontrava visível. Entretanto, como visto nos resultados, somente esse cuidado não é suficiente para mitigar o ruído da radiação difusa na medição de albedo.

4. DESENVOLVIMENTO DO SCRIPT DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Com o intuito de viabilizar a análise das fotografías em escala, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de segmentar a imagem, isolando a região da folha da região da superfície de interesse. Além disso, o *script* também

realiza o cálculo do albedo, relacionando o brilho médio dos *pixels* das duas regiões. O desenvolvimento foi inteiramente feito na linguagem de programação Python.

A segmentação da imagem é realizada por meio de operações morfológicas e técnicas de limiarização. Como forma de tornar a detecção mais adaptativa aos variados tipos de cenários encontrados, optou-se por utilizar o algoritmo de Otsu, N. (1979) para a determinação do limiar. A técnica determina o valor ideal do limiar para cada imagem.

No entanto, mesmo com a estimação do limiar para cada imagem, fez-se necessária a utilização da operação morfológica de abertura para remoção de pequenos ruídos. Em seguida a imagem sofre um novo redimensionamento, mas agora para o seu tamanho original. Nessa etapa, também é gerada uma imagem invertida, utilizando um processo de limiarização binária inverso.

As máscaras, obtidas na etapa anterior, serão utilizadas em operações lógicas do tipo *and* com a imagem original. Dessa forma, é possível isolar apenas as regiões de interesse e calcular o brilho médio dos *pixels* de cada uma das regiões, assim como o desvio padrão dos valores. O *script* armazena no banco de dados de saída os valores médios e o desvio padrão das duas regiões, assim como o albedo da imagem calculado a partir da equação Eq. (2). Também são armazenados os valores de ISO, abertura do obturador, tempo de abertura do obturador, data e hora, colhidos a partir do tratamento do arquivo Exif da imagem JPG. Um fluxograma das etapas de segmentação da imagem pode ser vista na Fig. 3.



Figura 3 - Fluxograma das etapas de processamento da imagem. Fonte: Autor

5. AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Com a ferramenta de processamento de imagens desenvolvida, pôde-se iniciar a análise da precisão do método de medição de albedo proposto. Para a definição da acurácia, os dados obtidos a partir das câmeras foram comparados com os dados medidos por um albedômetro composto por dois piranômetros modelo SR15-D2A2® (Hukseflux). Os equipamentos são classificados como Classe B, de acordo com a ISO 9060 (2018) e possuem resposta espectralmente plana na faixa de 280 a 3000 nm.

Os instrumentos foram devidamente calibrados pelo fabricante a menos de 12 meses da realização dos ensaios. A calibração foi realizada seguindo a ISO 9847 (1992). De acordo com o fabricante, a incerteza no processo de calibração é menor do que 1,8%, enquanto que o valor típico de incerteza para a calibração de piranômetros dessa classe é 2,8%.

O estudo foi desenvolvido na cidade de Petrolina - PE, no dia 05 de janeiro de 2021. Segundo a classificação de Köppen e Geiger, a cidade apresenta clima do tipo semi-árido e quente, BSh. O ponto escolhido, sob as coordenadas geográficas de -9,404444° de latitude, -40,497360° de longitude e 360 m, está situado na orla fluvial da cidade. A escolha do local se deu pelo fato de possuir facilidade no acesso, um vasto horizonte livre, solo uniforme e desprovido de vegetação, além de não haver obstáculos (edifícios, monumentos, árvores, dentre outros) que pudessem causar sombreamento durante o ensaio.

Os dois piranômetros SR15-D2A2® foram montados numa base, fornecida pelo fabricante, própria para medição de albedo. Na base, um dos piranômetros fica voltado para o céu, enquanto que o outro fica voltado para o solo. O conjunto foi fixado em um módulo treliçado a 2 metros de distância e a 1,5 metros do solo. A haste foi nivelada e

orientada de modo que o albedômetro apontasse para a linha do equador. Tanto a altura de instalação quanto a orientação do equipamento estão de acordo com as orientações dos fabricantes de piranômetros e têm como objetivo mitigar os efeitos causados pelas sombras projetadas pelo conjunto no solo.

Junto ao módulo treliçado, foi também montado um registrador de dados. O *datalogger*, modelo Orbit 360 Basic® (Kintech Engineering), foi pré-configurado para realizar a leitura dos sensores a cada segundo e armazenar os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão a cada minuto.

O papel foi posicionado a aproximadamente 3 metros de distância do sistema, em um local que preserva as mesmas características de solo. Os registros fotográficos foram realizados em intervalos sempre menores do que 10 minutos. Em cada sessão de fotos, foram feitos 10 registros com a câmera DSC-HX 350® (Sony) e 10 registros com o *smartphone* SM-N9600Z® (Samsung). No momento dos testes, havia nuvens espaçadas no céu que eventualmente cobriam o Sol. Em alguns momentos, foram capturadas imagens enquanto o céu estava coberto Entretanto, essa prática foi evitada devido às variações não uniformes nos brilhos médios das regiões do solo e da folha.

O *datalogger* armazenou uma série com 186 registros, das 11h55 às 15h03, horário local. Foram capturadas 561 imagens, em formato JPG, com a câmera Sony. Já com o *smartphone* foram obtidos 1154 arquivos, de 577 cenas, sendo metade em formato JPG e metade com extensão DNG. Ao longo do experimento o termohigrômetro registrou variações de temperatura e umidade relativa de 30,06 a 33,96°C e 31,86 a 48,95%, respectivamente.

6. RESULTADO

6.1 Análise preliminar

Os resultados para os 3 arquivos de saída provenientes das câmeras, assim como os dados processados a partir dos registros do *datalogger*, podem ser vistos na Fig. 4. As curvas são referentes às médias dos valores medidos em intervalos de 10 minutos.



Figura 4 - Dados de albedo dos ensaios do dia 05/01/2021. Fonte: Autor

O comportamento da curva obtida pelo albedômetro encontra-se dentro do esperado. De acordo com Cierniewski, et al. (2017) em condições de céu claro, o albedo dos solos atinge o valor mais baixo ao meio-dia solar local, enquanto o mais alto é alcançado ao nascer e pôr do Sol. O seu valor médio encontra-se dentro do intervalo obtido em Silva, et al. (2005), que calculou um albedo da ordem de 0,3 a 0,4 para solos desprovidos de vegetação em localidades próximas à cidade de Petrolina - PE.

Contudo, de maneira contraintuitiva, as curvas obtidas a partir dos arquivos JPG apresentam correlação negativa com a medição realizada pelo albedômetro. O erro médio do albedo obtidos no processamento dos arquivos JPG foi de 19,58% para o SM-N9600Z® (Samsung) e de 26,12% para a DSC-HX 350® (Sony), o que mostra não só um grande distanciamento para o valor do instrumento de referência, mas também entre os dois equipamentos. Com relação às curvas obtidas no processamento dos arquivos DNG, além de apresentar uma correlação positiva, o erro do seu valor médio, 5,75%, foi o menor valor observado.

6.2 Ensaio para obtenção do modelo preditivo

Diante da baixa acurácia obtida nos dados do primeiro ensaio, optou-se por realizar um novo ensaio com o objetivo de adquirir uma maior quantidade de dados para compor um modelo de correção das curvas. O sistema foi mais uma vez montado na cidade de Petrolina - PE, no dia 07/01/2021, porém em um novo local foi utilizado. O novo

ponto compartilha as mesmas características de solo e fica a aproximadamente 2700 m de distância do local utilizado no primeiro ensaio. O novo espaço está sob as coordenadas geográficas de -9,382028° de latitude, -40.508500° de longitude e 360 m de altitude. A escolha da localização se deu pelos mesmos motivos do local anterior.

A montagem e execução do novo experimento ocorreu de maneira análoga ao primeiro. As alterações ocorreram somente na frequência de coleta dos dados e na duração do ensaio. Dessa vez, os dados foram coletados sempre em intervalos menores que 5 minutos e o teste foi realizado das 08h46 às 15h18, horário local. Durante esse intervalo, o *datalogger* registrou a média, o máximo, mínimo e o desvio padrão dos sensores 393 vezes. Com as câmeras, foram registradas 3465 imagens, sendo 1231 imagens em formato JPG da câmera DSC-HX 350® (Sony) e 1117 amostras para cada tipo de arquivo gerado pelo *smartphone* SM-N9600Z® (Samsung).

Da mesma maneira que no experimento anterior, as imagens foram cuidadosamente capturadas quando o Sol não estava coberto por nuvens. Entretanto, em alguns momentos foram coletadas imagens em situação de Sol encoberto, gerando alguns vales nas curvas de albedo estimado a partir das imagens das câmeras. No dia da realização do ensaio, o clima não estava completamente estável para realização de uma calibração em ambiente aberto. Apesar de haver uma baixa cobertura de nuvens, no período da manhã elas se encontravam muito próximas ao disco solar.

Durante o período da tarde, as nuvens passaram a se distanciar do Sol e ocupar cada vez mais a linha do horizonte. Segundo Cierniewski, et al. (2017), quanto maior a cobertura de nuvens, maior a quantidade de radiação difusa. Nos dias com uma irradiância difusa mais elevada, como dias parcialmente nublados ou totalmente nublados, o albedo muda com o tempo e é ligeiramente mais elevado do que em dias claros (DITTMANN, et al., 2019).

O efeito do aumento da radiação difusa descrito por Dittmann, et al. (2019), pode ser notado nas curvas de albedo da Fig. 5 obtidas no ensaio. É possível verificar um valor médio maior durante o período da manhã, assim como uma presença maior de ruídos, quando comparado com o período das 13h00 às 15h00. Observou-se novamente uma correlação negativa para as curvas JPG com relação às curvas do albedômetro. Para as condições de teste, o comportamento da curva apresentada pelo albedômetro, encontra-se dentro do esperado.

Os erros médios tiveram valores bastante similares aos encontrados no primeiro ensaio, 20,24% para o SM-N9600Z® (Samsung), 24,95% para a DSC-HX 350® (Sony) e 7,86% para o arquivo bruto do *smartphone*. Esse fato corrobora com a ideia de que esses valores são reprodutíveis para uma mesma câmera e um mesmo tipo de solo. Analisando a correlação das curvas obtidas com os dados das câmeras com a medição do albedômetro, percebeu-se o mesmo comportamento do teste anterior. As imagens em formato JPG mantiveram a correlação negativa, enquanto que a curva de albedo do arquivo bruto continuou apresentando correlação positiva. Entretanto, o valor das correlações da câmera Sony apresentaram uma queda acentuada. Essa queda pode ser justificada pelo aumento da radiação difusa no período da manhã e pelo efeito causado na curva de albedo mensurada por esse equipamento. Após a análise qualitativa e quantitativa das curvas, foi iniciado o trabalho de desenvolvimento dos modelos preditivos para a correção das curvas. Todos os modelos foram avaliados utilizando técnicas de validação cruzada.



Figura 5 - Dados de albedo dos ensaios do dia 07/01/2021. Fonte: Autor

6.3 Modelo linear

Para o treino dos três modelos, foram utilizados, respectivamente, os 1231 registros da câmera DSC-HX 350® (Sony) e as 1117 amostras para cada tipo de arquivo gerado pelo *smartphone* SM-N9600Z® (Samsung). Contudo, como o banco de dados de imagens possui várias imagens no intervalo de um minuto, enquanto que o *datalogger* faz registros a cada minuto, somente os valores registrados pelo armazenador de dados no mesmo minuto da captura das imagens foram utilizados para o modelo. Dessa forma, dos 393 valores médios de albedo dados pelo *datalogger*, apenas 136

foram utilizados para o modelo de ajuste da câmera Sony e 121 valores para os dois modelos do *smartphone* Samsung. Nos testes, foram utilizados os dados obtidos no primeiro ensaio. O *dataset* de teste possui 561 dados para a curva da DSC-HX 350® (Sony), além de 577 dados para cada tipo de arquivo do aparelho SM-N9600Z® (Samsung).

O primeiro modelo utilizado foi o modelo dos mínimos quadrados. Os valores previstos pelo modelo foram comparados com os valores originais, assim como com os valores medidos pelo albedômetro no primeiro ensaio. Na primeira tentativa, os modelos foram criados utilizando somente os dados de albedo como variável preditora e os dados dos piranômetros como variável alvo.

As curvas ajustadas pelos modelos apresentam um bom ajuste do valor médio, reduzindo os erros do valor médio para valores menores do que 2%. Entretanto, os baixos valores de de R² e o comportamento ligeiramente constante da curva, evidenciam que os modelos sofrem *underfitting*. Os modelos são simples e incapazes de realizar a correção dos dados em função da sua variação temporal.

6.4 Modelo linear múltiplo

Para o melhoramento dos resultados, optou-se por utilizar um modelo de regressão linear múltipla. Analisando as curvas obtidas, foi constatado que a variável preditora teria que ter forte relação com o comportamento temporal do albedo, para que assim a curva de ajuste obtida passasse de fato a acompanhar os valores alvo e não só se ajustar ao valor médio da curva de referência.

Foi utilizada a elevação solar aparente, obtida a partir das coordenadas geográficas e dos horários das fotografias. Com as informações de elevação solar, passou-se também a seguir as orientações da norma E1918-06 (2015) e utilizar somente valores de albedo mensurados quando a elevação solar é superior a 45°.

Com a inclusão da elevação solar e a utilização de um modelo linear múltiplo, foi possível observar um aumento de até 15 vezes no valor de R² para o ajuste dos dados da câmera Sony. Também foi possível notar um comportamento angular mais acentuado nas curvas de albedo, além de uma redução percentual média de 41% nos erros obtidos para os valores médios. Contudo, apesar da melhora, os valores de R² permaneceram baixos.

6.5 Modelo Random Forest

Por fim, foi testado um modelo Random Forest, baseado em algoritmos de aprendizado de máquina. Assim como o modelo anterior, somente os valores de albedo obtidos a partir do processamento das imagens e os dados de elevação solar aparente foram utilizados como variáveis preditoras. O alvo também permaneceu inalterado em relação ao modelo anterior. Os dados obtidos a partir do novo modelo podem ser observados na Tab. 1 e nas Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9.

Equipamento	Samsung DNG	Samsung JPG	Sony JPG
Albedo original	0,3199	0,3749	0,4081
Albedo corrigido	0,2985	0,2983	0,2987
albedo referência	0,3015	0,3015	0,2996
R ²	0,9948	0,9947	0,9942
Erro médio entre as medidas	1,59%	1,25%	1,63%
Erro do valor médio	0.51%	0.56%	0.17%

Tabela 1 - Resultados obtidos com o modelo Random Forest.



Figura 7 - Comparação entre a curva ajustada, pelo modelo Random Forest, com as curvas originais para os arquivos DNG do SM-N9600Z® (Samsung) no dia 05/01/2021. Fonte: Autor



Figura 8 -Comparação entre a curva ajustada, pelo modelo Random Forest, com as curvas originais para os arquivos JPG do SM-N9600Z® (Samsung) no dia 05/01/2021. Fonte: Autor



Figura 9 - Comparação entre a curva ajustada, pelo modelo Random Forest, com as curvas originais para os arquivos JPG da DSC-HX 350® (Sony) no dia 05/01/2021. Fonte: Autor

Com a aplicação da técnica Random Forest, foi possível reduzir ainda mais os valores do erro observado para o valor médio das curvas. Os valores de R² dos modelos apresentam um ganho percentual médio de 72% com relação aos modelos de regressão linear múltipla. Também foi percebida uma melhora na capacidade dos modelos de ajustar os valores medidos em função das variações temporais da curva de referência.

Entretanto, é válido esclarecer que os modelos somente são válidos para as condições descritas neste trabalho. Mudanças nos horários de aquisição das imagens, nas condições climáticas, na parametrização das câmeras, nas características do solo e na folha utilizada como superfície de referência, podem causar diferenças na sua acurácia.

7. CONCLUSÃO

7.1 Considerações finais

Nesse estudo, foram realizadas avaliações, qualitativas e quantitativas, para o aprimoramento do método de predição de valores de albedo do solo a partir da relação do seu brilho médio com o brilho médio de uma folha de papel sulfite. Foi ainda desenvolvido um *script* para automatização do processo de análise das imagens, além de um modelo de calibração dos dados de albedo do solo obtidos a partir das imagens.

Dentre os modelos testados, o que apresentou melhor acurácia foi o modelo baseado em aprendizado de máquina Random Forest. O modelo preditivo, com R² superior a 0,99, foi capaz de reduzir o erro médio das medições realizadas no primeiro ensaio, para valores menores do que 1%, quando comparados com valores medidos por piranômetros hukseflux SR15-D2A2 devidamente calibrados. Dessa maneira o modelo pode ser utilizado para ampliação dos pontos de medição de um local, assim como para a medição em locais que tiveram suas campanhas de medição encerradas, mas que não possuíram albedômetros em seu escopo.

Contudo, é correto afirmar que os modelos de ajuste somente são válidos para a calibração de curvas obtidas nas com o mesmo arranjo utilizado no estudo. Quaisquer variações na câmera, papel e no solo podem impactar na invalidação do modelo. Além disso, apesar dos testes com validação cruzada, o baixo número de amostras utilizadas para a obtenção dos modelos, assim como a presença de ruído nas curvas de referência podem estar gerando *overfiting* nos modelos *Random Forest*. A realização de mais ensaios e o aumento dos bancos de dados de teste e treino tornariam o método ainda mais robusto e seguro.

8. REFERÊNCIAS

- BRENNAN, P. A. Medidas de albedo no Monte. Site de teste Lassen. Nevada Univ. Reno, NV, United States. NASA-CR-101794., 1968.
- CIERNIEWSKI, J. et al. Predicting the diurnal blue-sky albedo of soils using their laboratory reflectance spectra and roughness indices. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Volume 200, p. 25-31, 2017.
- DITTMANN, S. et al. Comparative Analysis of albedo measurements (Plane-of-array and horizontal) at multiple sites worldwide. 10.4229/EUPVSEC20192019-5DO.1.4., 2019.
- DELINE, C. et al. Bifacial PV System performance: separating fact from Fiction. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74090.pdf. Acesso em: 02 mar. 2021. Publicado em 2019.
- American Society for Testing and Materials. E1918-06: Standard Teste Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field. West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos, 2015.
- International Organization for Standardization ISO 9847 :Solar energy Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Technical Committee ISO/TC 180, Solar energy, Sub-Committee SC 1, Climate Measurement and data. 1992.
- International Organization for Standardization ISO 9060: Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. Technical Committee ISO/TC 180, Solar energy, Subcommittee SC 1, Climate Measurement and data. 2018.
- MARION, B. Measured and satellite-derived albedo data for estimating bifacial photovoltaic system performance. Solar Energy, Volume 215, Pages 321-327, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.050, 2021.
- MORTON, S. Albedo Effects in Polar Regions. In: https://scholarworks.umass.edu/. 2012. Disponível em: https://scholarworks.umass.edu/stem_ipy/11/. Acesso em: 19 de mai. 2021.
- POST et al. Predicting Soil Albedo from Soil Color and Spectral Reflectance Data. Soil Sci. Soc. Sou. J., 64: p. 1027-1034, 2000.
- OATSU, N. A thresholding selection method from gray-level histograms. IEEE Trans System Man Cybernetic. 1979, pp. 62-66
- SÁNCHEZ-ORTIZ et al. The effect of clearance height, albedo, tilt and azimuth angle in bifacial PV energy estimation using different existing algorithms. Escola de Engenharia Eletrônica, Instituto de Tecnologia da Costa Rica, Costa , 2020.
- SILVA et al. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. Rev. Bras. Agrometeorologia, v. 13, n.2, p. 11-21, 2005. ISSN 0104-1347
- TAKATA, M. Tecnologias de módulos e células fotovoltaicas. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, out. 2019. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, out. 2019. Disponível em https://bit.ly/351h4yC. Acesso em 02 mar de 2021.

METHODOLOGY FOR DETERMINING SOIL ALBEDO FROM DIGITAL IMAGE PROCESSING

Abstract. The fraction of incident light reflected by a surface is defined as its albedo. Knowing the albedo of a given area is useful for studies related to photovoltaic power plant projects that use biface modules. Unlike conventional panels, these modules are capable of generating electricity from their two sides. Among the advantages associated with its use, the increase in energy density stands out. Some recent works show the strong relationship that albedo has with the energy gain provided by bifacial panels. Knowing the seasonality of albedo is of paramount importance for forecasting and pricing calculations for the energy generated in the project. Current regulations recommend that soil albedo be measured using pyranometers. However, the expense with the acquisition and maintenance of these equipments ends up making its installation unfeasible. As a result, the objective of this work was to evaluate the feasibility of a low-cost methodology for measuring soil albedo. The methodology used suggests that the soil albedo can be obtained from the analysis of the brightness of the regions of an image containing the soil and a white sheet. In order to calculate the accuracy of the method, soil images were collected in the city of Petrolina-PE and compared with measurements using SR15-D2A2 (Hukseflux) pyranometers. In addition, a script for the mass processing of images was developed, as well as an adjustment model using the Randon Forest algorithm, with R² > 0.99, which relates the data obtained from image processing with measured values by an albedometer composed of Hukseflux brand pyranometers.

Key words: Solar Energy, Soil Albedo, Predictive Model.